大気科学

Atmospheric Science

大気現象の科学，気象学+気候学

金曜日 8:45~12:00, K206

広島大学先進理工系科学研究科

総合科学部自然環境科学

小澤　久

Ver. 2025

Hisashi Ozawa, Hiroshima Univ.

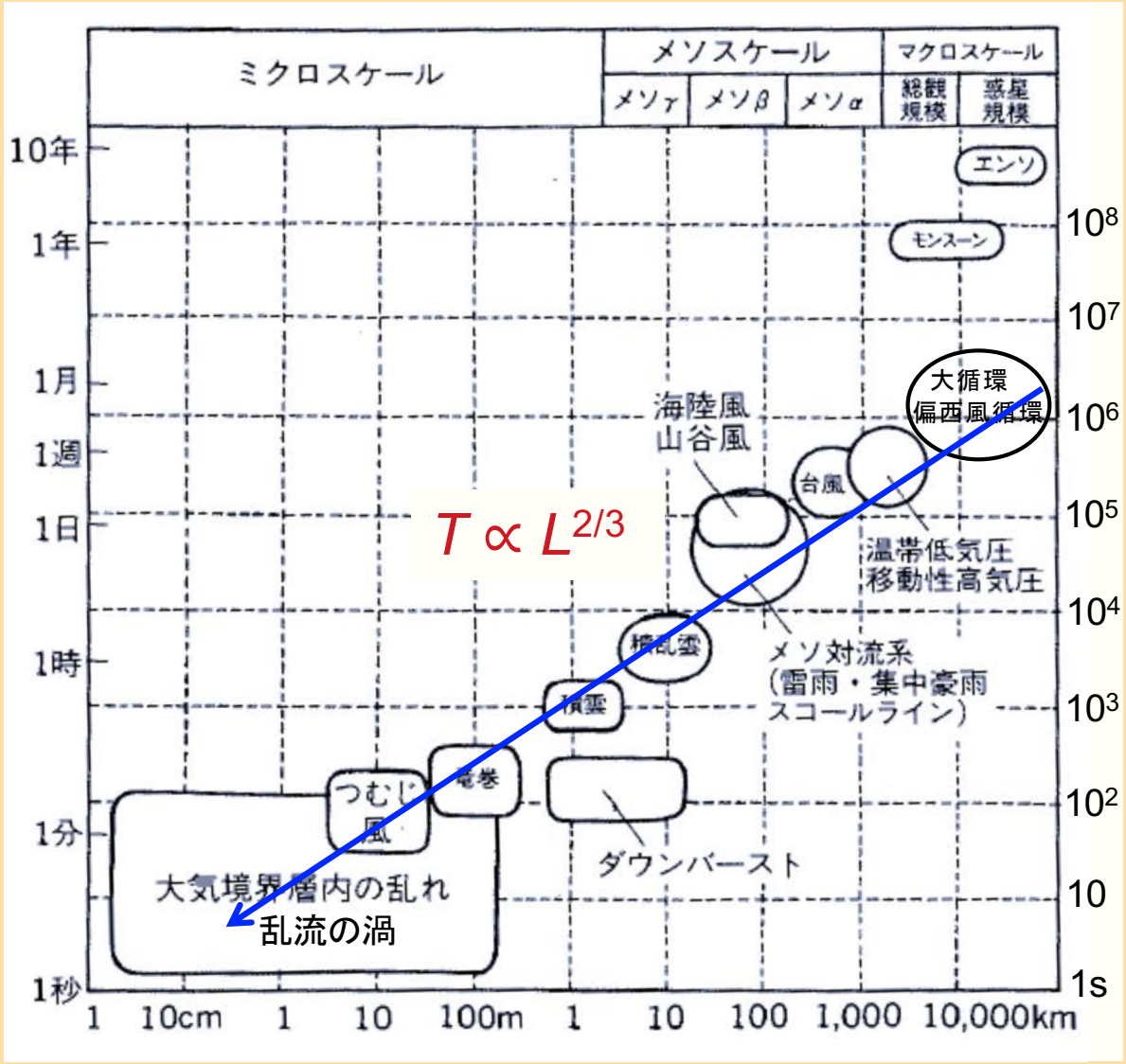
概要

Part 1. 大気と放射
- 地球と惑星の大気
- 地球の放射収支
- 地球大気の鉛直構造
- 放射収支の緯度分布

Part 2. 大気の運動
- 流体の運動方程式
- 地球の回転の効果
- 有効位置エネルギー
- 大気大循環の構造と熱エネルギーの輸送

Part 3. 大気の現象論
- 蒸発と凝結現象
- 乱流現象と輸送特性
- 有効位置エネルギーの生成率
- おわりに

板書メモ：大気現象の時間•空間スケール



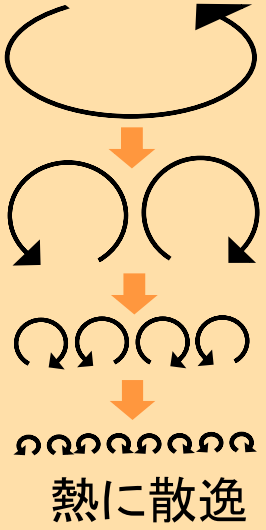
小倉 (1999)

なぜか？

$T \approx L / v_L \propto L^{2/3}$

($v_L \propto L^{1/3}$?)

- 渦運動によるエネルギー輸送



$\varepsilon \propto v_L^3 / L$

≈ 一定

(→ Part 3-2 乱流現象)

⇒ エネルギー輸送が起きている！

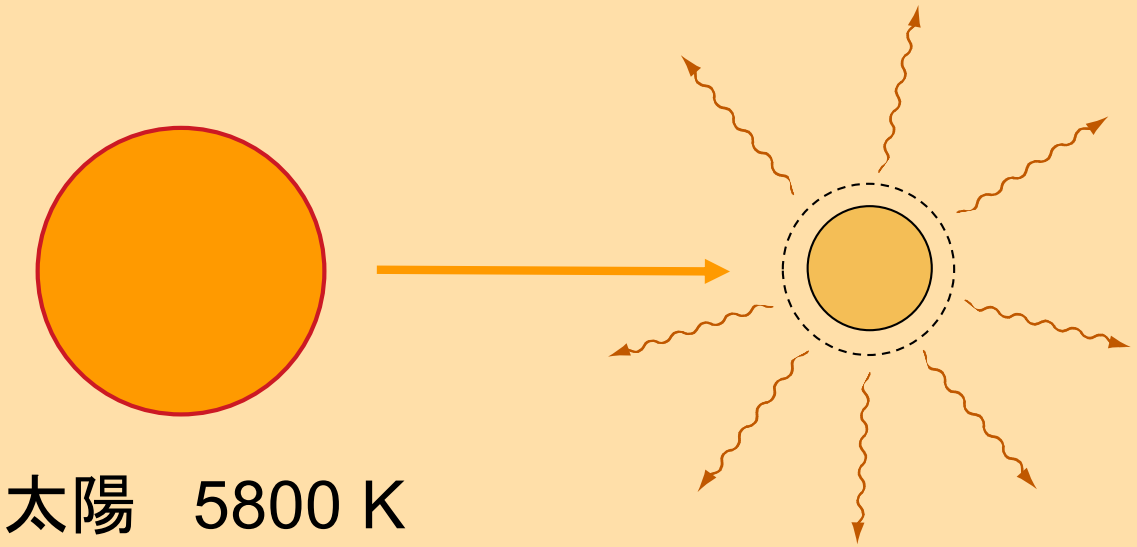
参考文献

- 小倉義光「一般気象学」, 東京大学出版会, 1984. (第2版, 1999)
- 浅井富雄他「基礎気象学」, 朝倉書店, 2000.
- 田中浩「大気科学とその周辺」, 現代図書, 2004. (20章の考察)
- Lorenz, E. N., “The Nature and Theory of the General Circulation of the Atmosphere”, WMO, Geneva, 1967.
- Hartmann, D. L., “Global Physical Climatology”, Academic Press, 1994.

Part 1. 大気と放射

1-1. 地球と惑星の大気

太陽系 (太陽•惑星•宇宙系) でのエネルギーの流れ



絶対温度
(K = °C +273)

エネルギーの流れ：高温 → 低温

Hisashi Ozawa, Hiroshima Univ.

太陽系の惑星

[岩石質] 地球型惑星 ⟷ [ガス質] 木星型惑星

天文学的諸量	水星	金星	地球	火星	木星	土星	天王
太陽からの距離 (地球=1)	0.39	0.72	1	1.52	5.20	9.53	19.2
公転周期 (年)	0.24	0.62	1	1.88	11.9	29.5	84.0
自転周期 (日)	59	243	1	1.0	0.41	0.44	0.72
赤道半径 (地球=1)	0.38	0.95	1	0.53	11.2	9.4	4.0
質量 (地球=1)	0.06	0.82	1	0.11	319	95	15
密度 (水=1)	5.4	5.2	5.5	3.9	1.3	0.7	1.3
太陽放射量 (地球=1)	6.7	1.9	1	0.43	0.037	0.011	0.003
反射率 (アルビード)	0.06	0.78	0.30	0.16	0.73	0.77	0.82
有効放射温度 (K)	440	224	255	216	88	63	41
大気の主要成分	無	CO_2,N_2	N_2,O_2	CO_2,N_2	H_2,He	H_2,He	H_2,He

理科年表 (2005) より

“双子星”

Hisashi Ozawa, Hiroshima Univ.

地球型惑星の大気組成の比較

気体	金星	地球	火星
CO_2 (%)	96	0.04	95
N_2	3.4	78	2.7
Ar	0.01	0.9	1.6
O_2	0.0	21	0.1
H_2O	0.0	0.1–1	0.03
総気圧 (atm)	90	1	0.006
地表気温 (K)	735	287	222

不安定

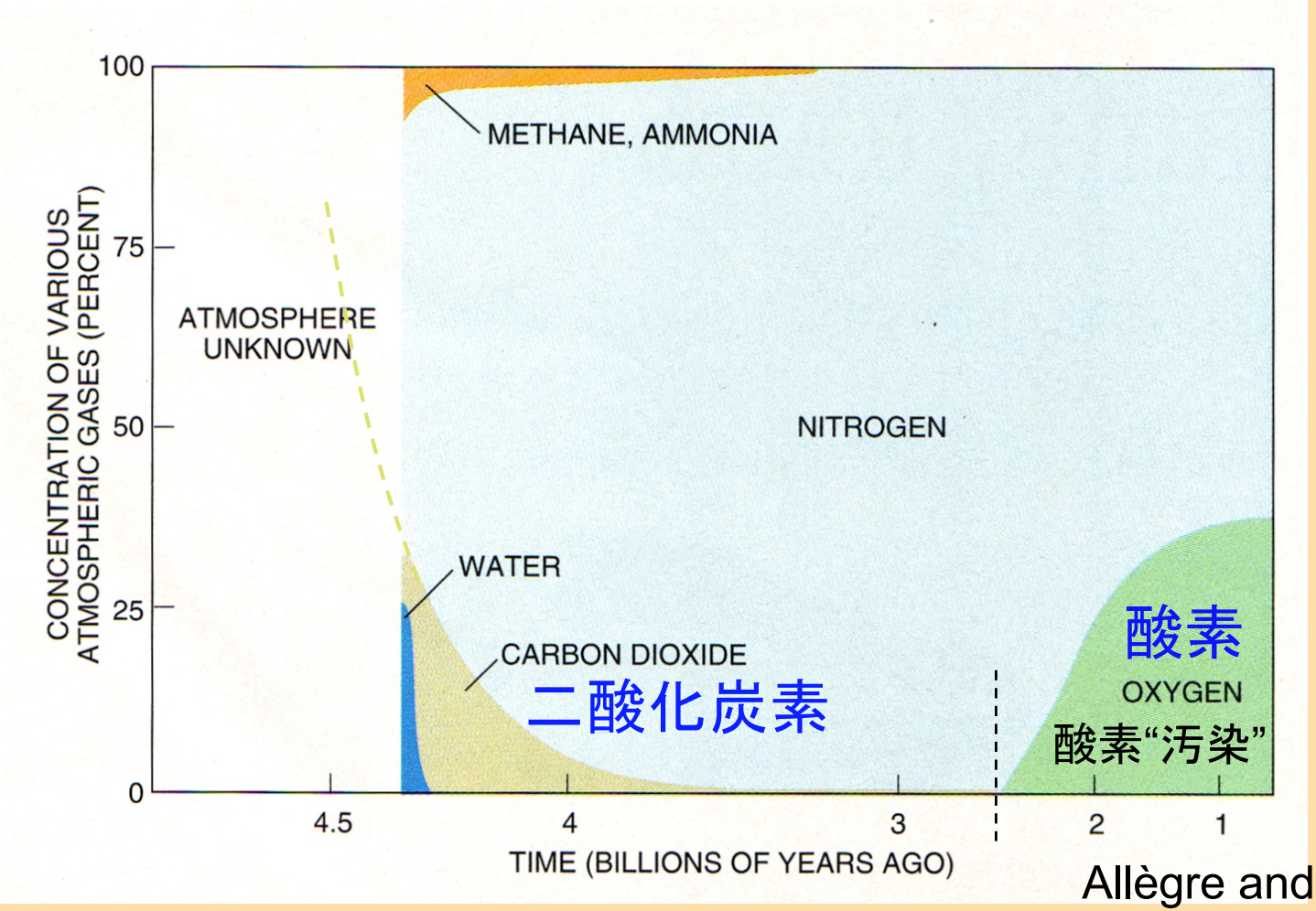
Lovelock (1972) 地球の奇妙な大気組成 ⇐ 生物活動？

↓

時間と共に変化！

Hisashi Ozawa, Hiroshima Univ.

地球の大気組成の変化

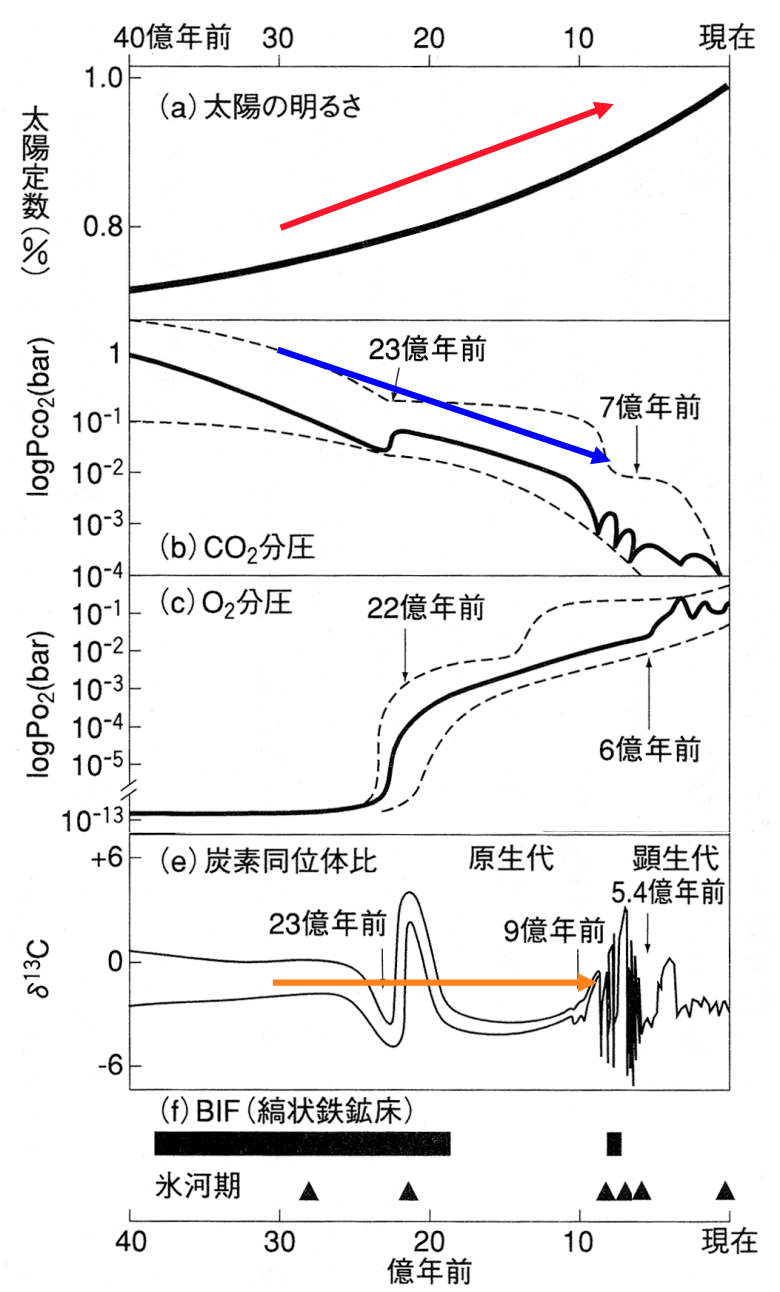


Allègre and Schneider (1994)

光合成生物が，二酸化炭素を固定し，酸素を放出した。

⇒ 化石燃料，石灰岩へ

太陽放射量と大気組成の変化と気温の関係



太陽放射量の増加

↓

光合成生物の活動が活発化

↓

CO_2 (温室効果ガス) の固定

↓

気温は，ほぼ一定に推移

生物と大気の相互作用

Kaufman (1997), 川上 (2000)

“死の地球”と現在の地球の大気組成

気体	金星	“死の地球”		現在の地球	火星
CO_2 (%)	96	95	⇒	0.04	95
N_2	3.4	1.9		78	2.7
Ar	0.01	0.1		0.9	1.6
O_2	0.0	0.0	⇒	21	0.1
総気圧 (atm)	90	60	⇒	1	0.006
地表気温 (K)	735	≈ 550	⇒	287	222

Lovelock (1988)

生物による気温の調整？

(287 ± 10 K)

James Lovelock
(1919–2022)

Gaia 仮説

生物とそれを取り巻く大気は，互いに影響を及ぼしながら全体として恒常性を保ちつつ変化してきた。

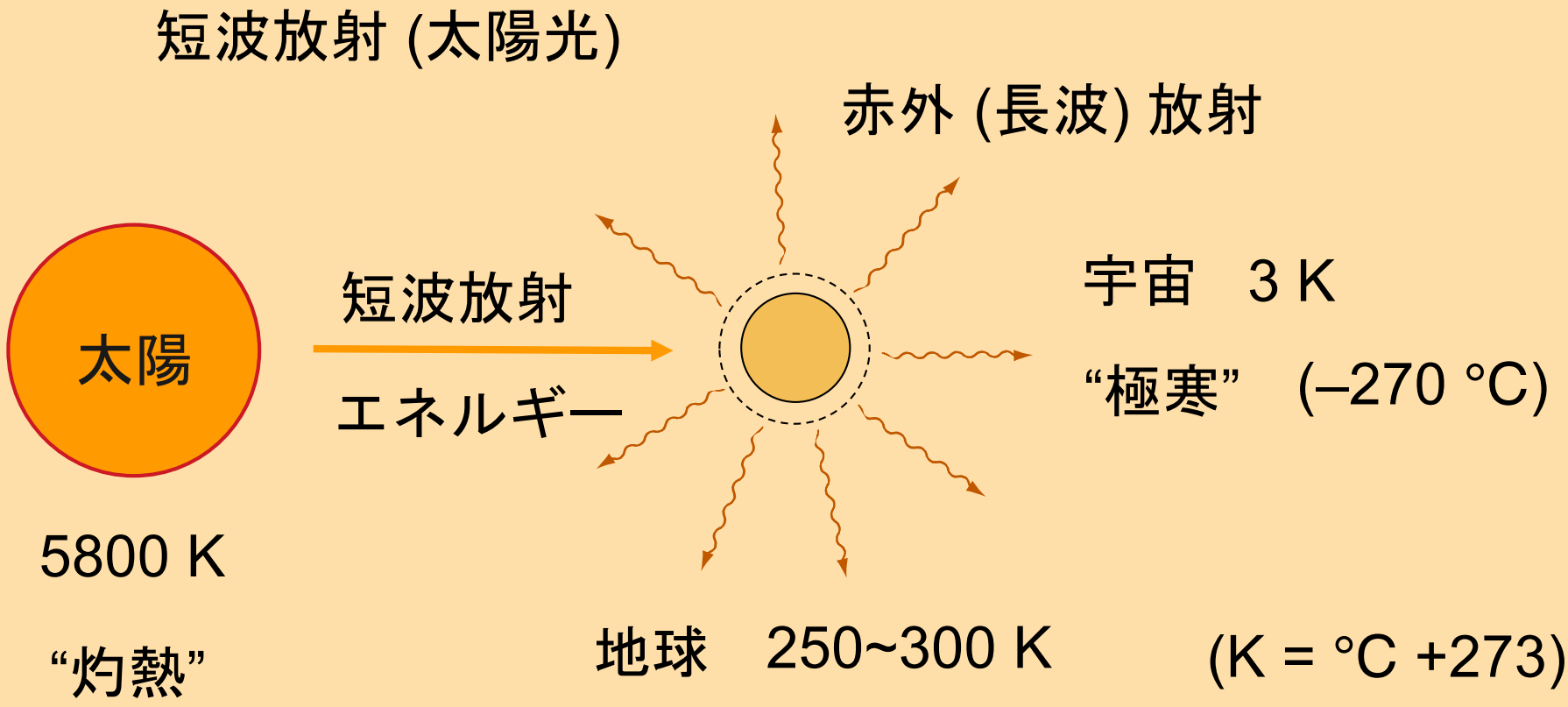
全体が一つのシステム

↓

Gaia

1-2. 地球の放射収支

地球は，太陽放射によって暖められている。



Hisashi Ozawa, Hiroshima Univ.

すべての物質は，“暖かさの度合い” に応じた量の放射の

(固体, 液体, 気体 ...)　　絶対温度

エネルギーを外向きに放出する。 ⬅ 熱運動

- 放射のエネルギー流 $\propto$ (絶対温度)^4

[Stefan–Boltzmannの法則 (絶対温度の4乗則)]

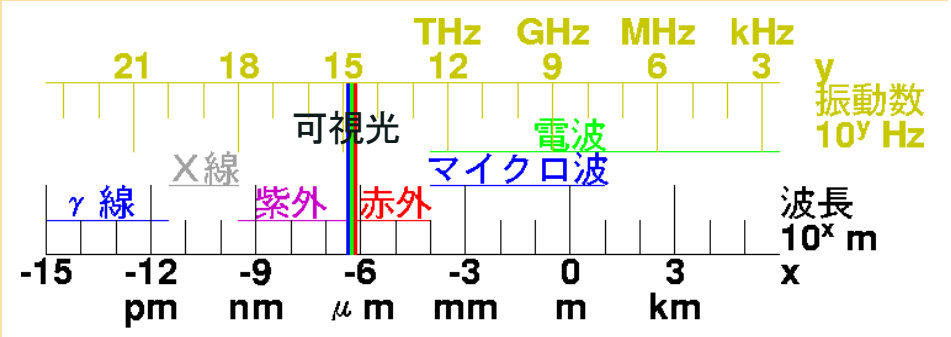
$F \approx \sigma T^4$　　$\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$

(W/m^2)　(K)　　Stefan–Boltzmann定数

- 放射の波長 $\propto$ 1/(絶対温度)

$\lambda_m \approx 2.9/T$　　[Wienの法則]

(mm)　(K)

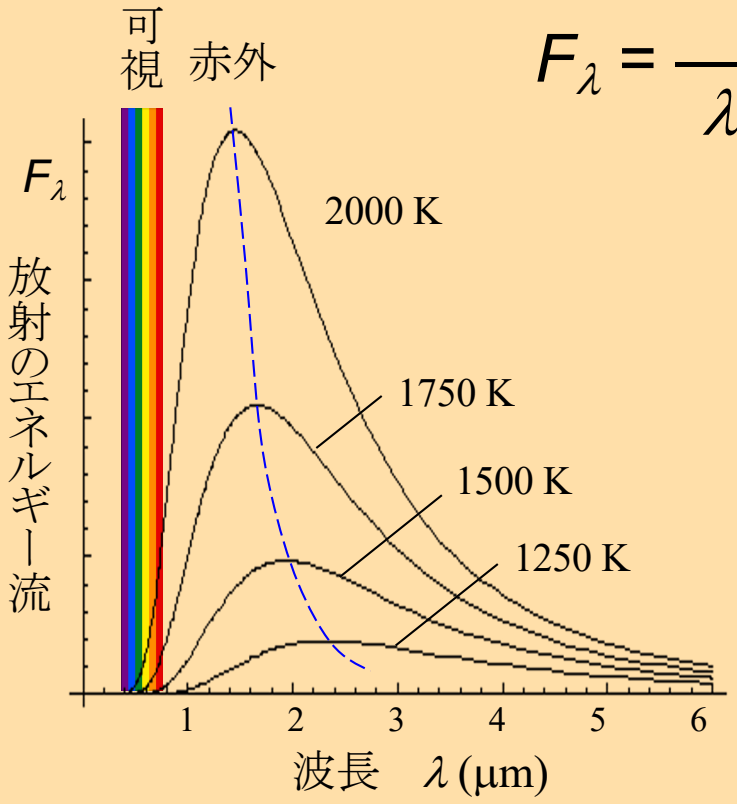


なぜか？

Planckの黒体放射の理論　　Max Planck (1901)

絶対温度 T の物質 (黒体) の表面 (1 m^2) から外向きに放出される波長 λ の放射のエネルギー流: F_λ

- 黒体近似
- 量子仮説



$$F_\lambda = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)}$$

c : 光速，　h, k : 物理定数

＊温度だけから放射量がきまる。

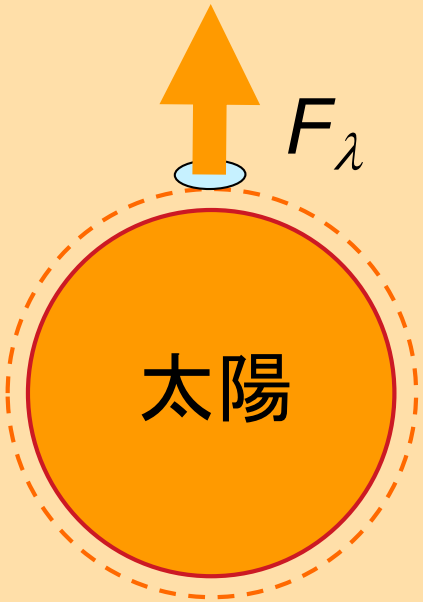
全エネルギー流 : F (W/m^2)

$$F = \int F_\lambda \, d\lambda = \frac{2\pi^5 k^4}{15 c^2 h^3} \cdot T^4 = \sigma$$

$$\lambda_m \text{ (mm)} \approx \frac{2.9}{T}$$ ［Wienの法則］

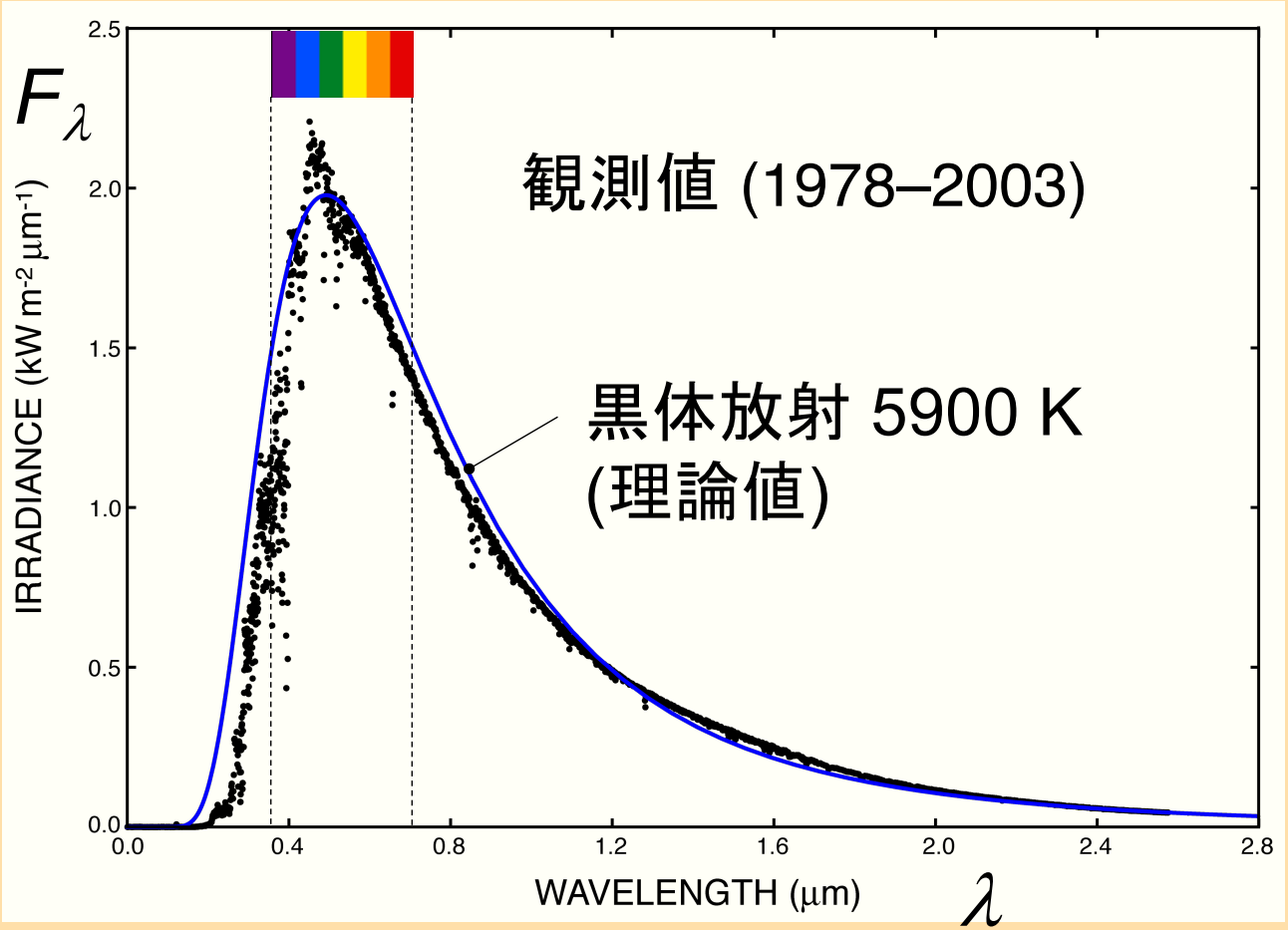
理論と観測の比較

1. 太陽の表面から放出される放射: 短波放射



5800 ~ 5900 K

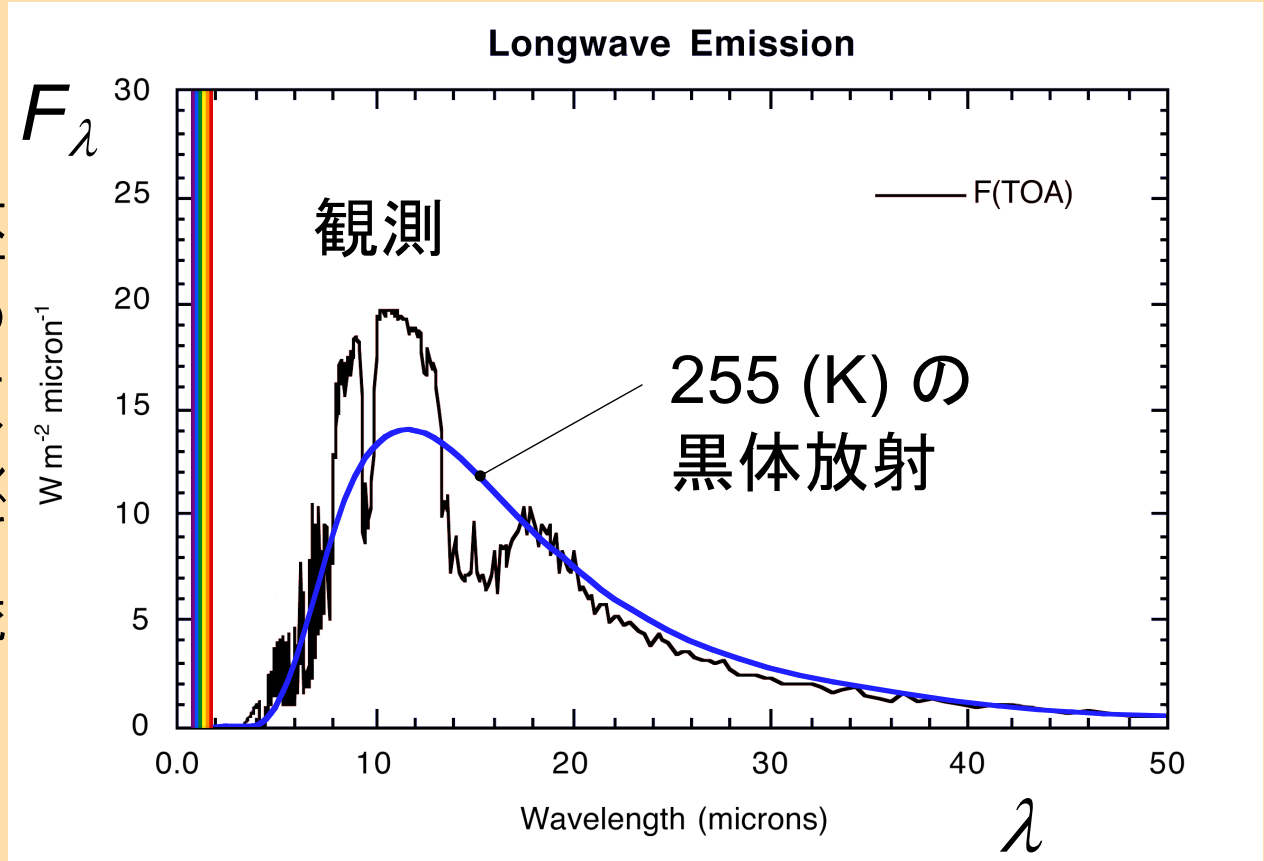
放射のエネルギー流



Gueymard (2004)

理論と観測の比較

2. 地球の大気上層からの放射: 長波放射

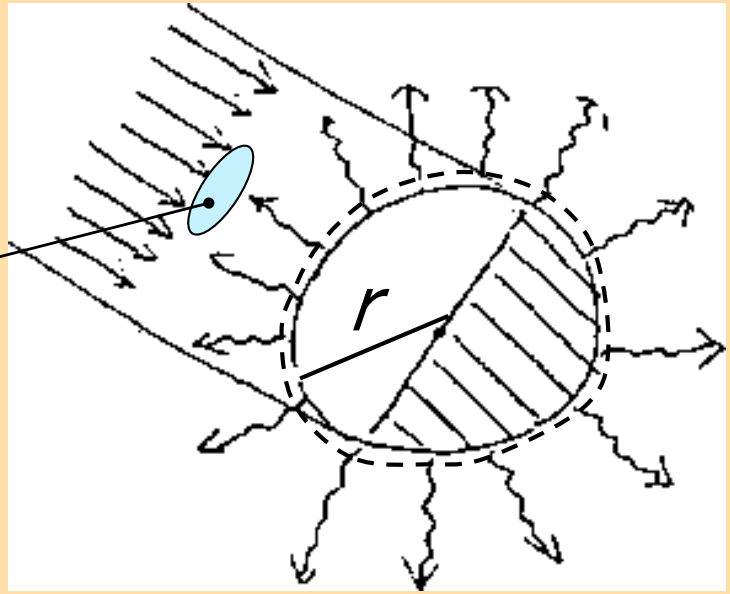


＊なぜ大気上層の平均温度が 255 K になるのか？

Kiehl and Trenberth (1997)

地球全体のエネルギー収支

太陽



宇宙

太陽定数: R
(単位面積当たり
のエネルギー流)

r : 地球の半径

- 太陽の短波放射の吸収率 = 地球の長波放射の放出率

$$R\,\pi r^2\,(1-\alpha) = 4\,\pi r^2\,\sigma T_e^4$$

断面積　　表面積　Stefan–Boltzmannの法則

α : 惑星アルビード (短波放射に対する平均反射率)

T_e : 有効放射温度 (大気上層の温度)

有効放射温度 : T_e

$$T_e = [(1-\alpha)R/4\sigma]^{1/4}$$

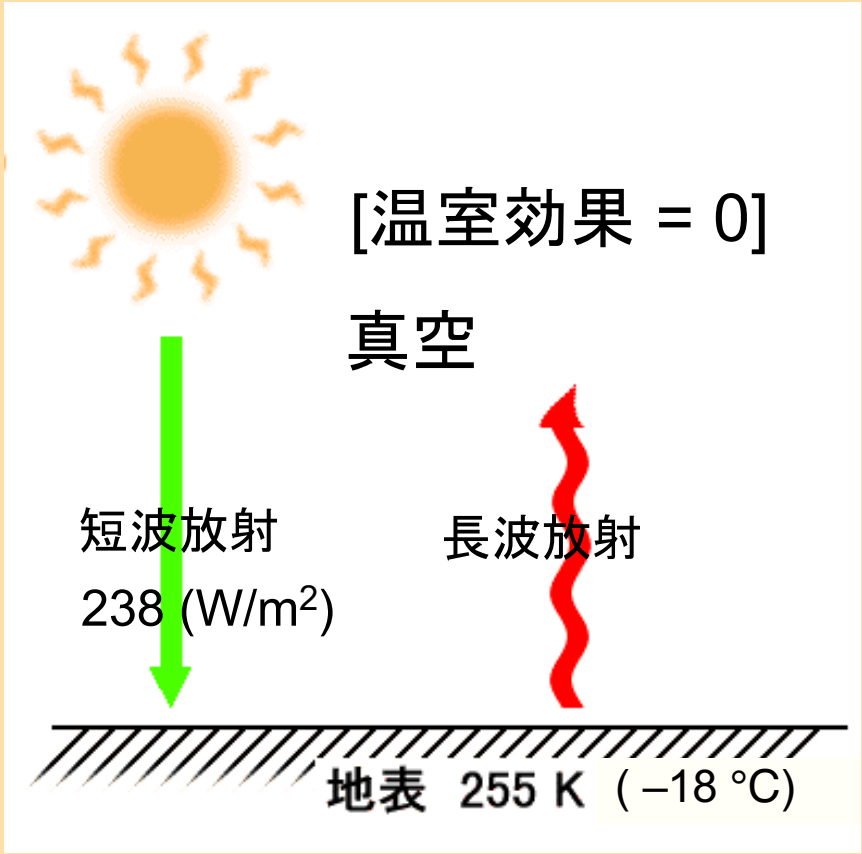
$$\approx 255\ \mathrm{K} \quad (-18\ ^\circ\mathrm{C})$$

- α : 惑星アルビード（反射率）≈ 0.30
- R : 太陽定数 ≈ 1360 W/m^2
- σ : Stefan–Boltzmann定数 (5.67 × 10^{-8} W m^{-2} K^{-4})

＊地球の大気上層の平均温度は，放射のエネルギーのバランスから決まっている。

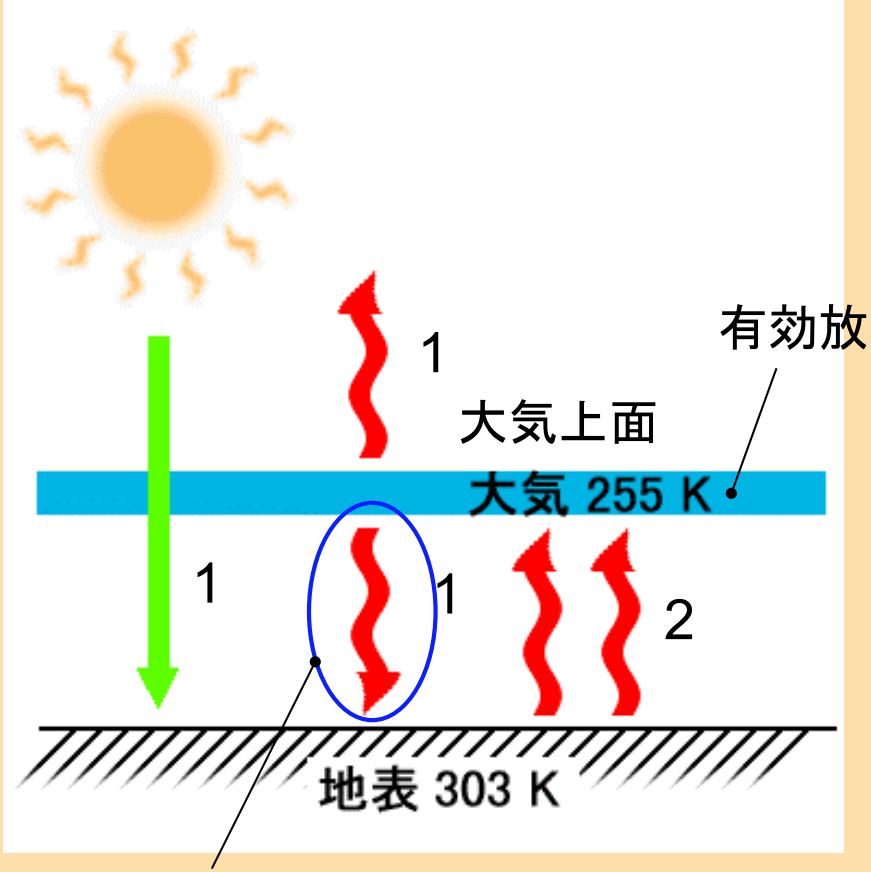
1-3. 地球大気の鉛直構造

1. 大気がない場合



平均地表温度 ≈ 255 K
(有効放射温度)
“極寒” の地球

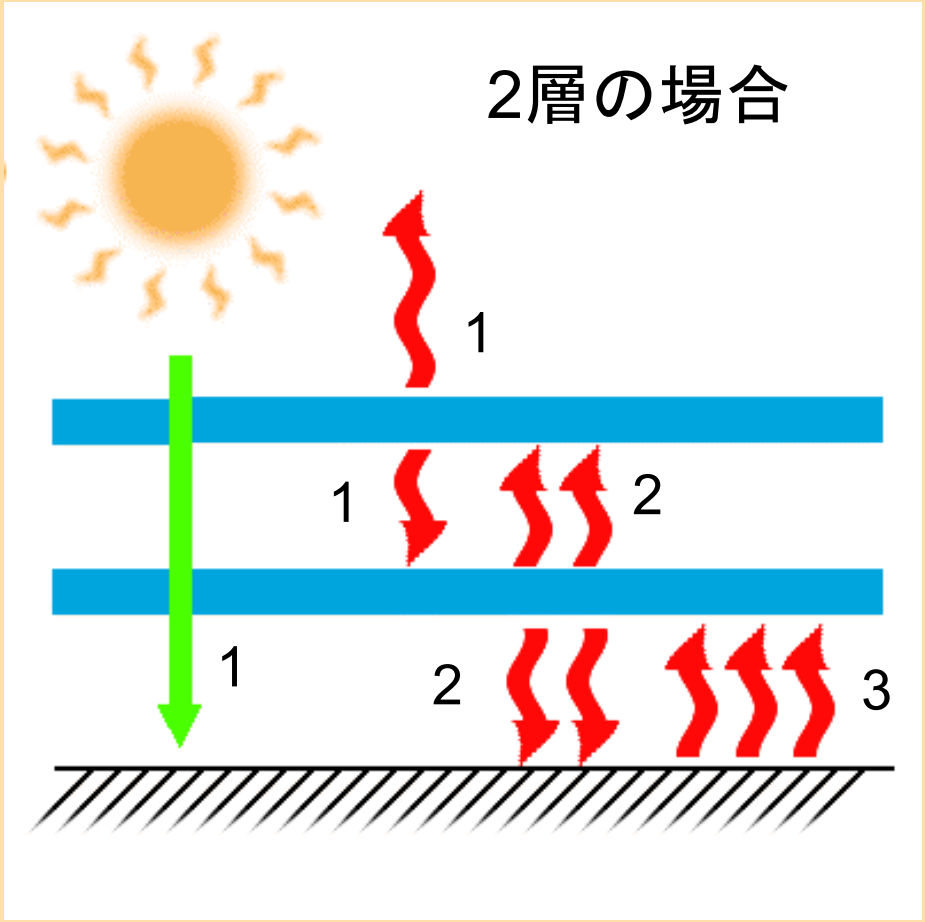
2. 大気がある場合 (1層)

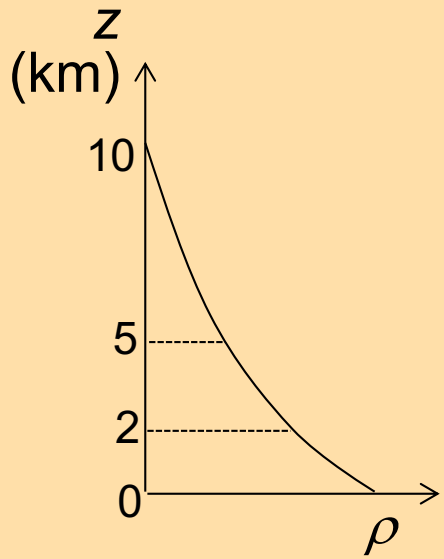


大気の「温室」効果 (水蒸気, CO_2)
60~70 % 25 %
地表温度 >> 有効放射温度

Hisashi Ozawa, Hiroshima Univ.

実際の大気: 約3層分の温室効果





大気層 1 ≈ 255 K

∧

大気層 2 ≈ 303 K

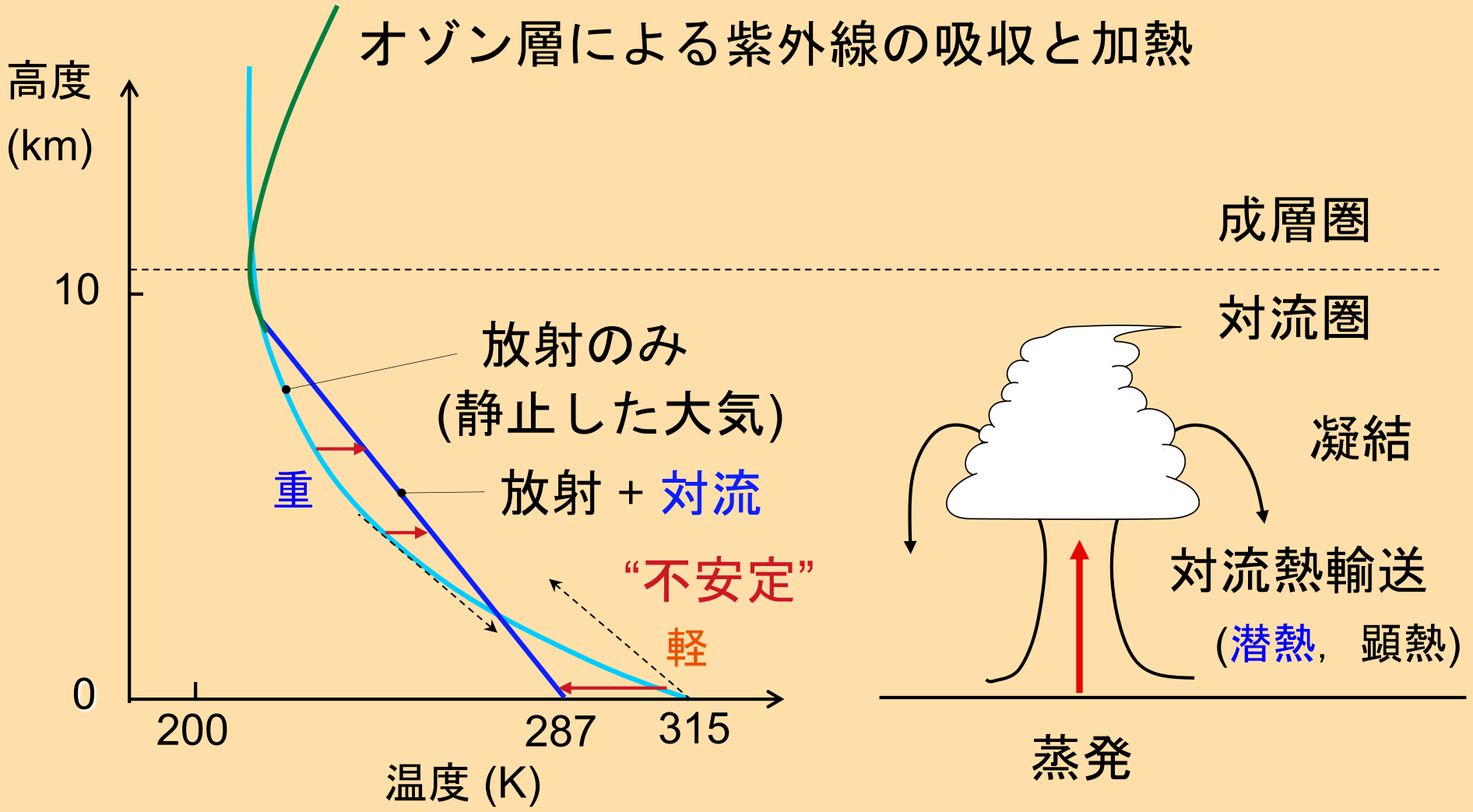
∧

地表温度 ≈ 335 K

下層程，温度が上昇

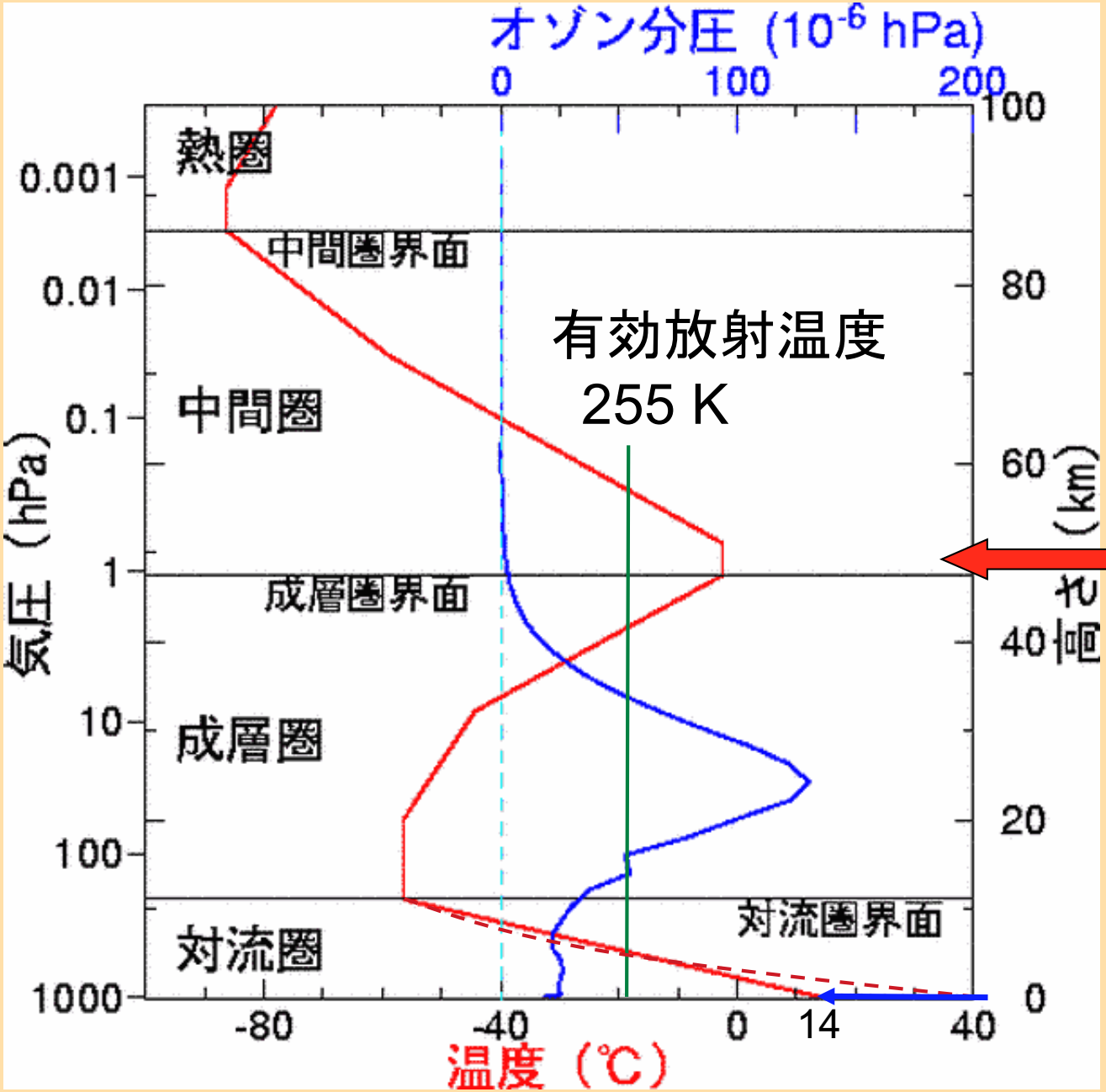
- 実際の大気は連続的。短波放射を吸収し，対流も起きている。

3. 連続的な大気 (3層分の温室効果+短波放射の吸収)

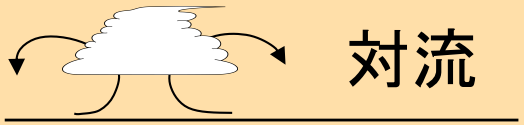


- 対流による熱輸送により，地表が冷やされている。

大気温度の高度分布 (観測)



オゾン層での紫外線の吸収と加熱

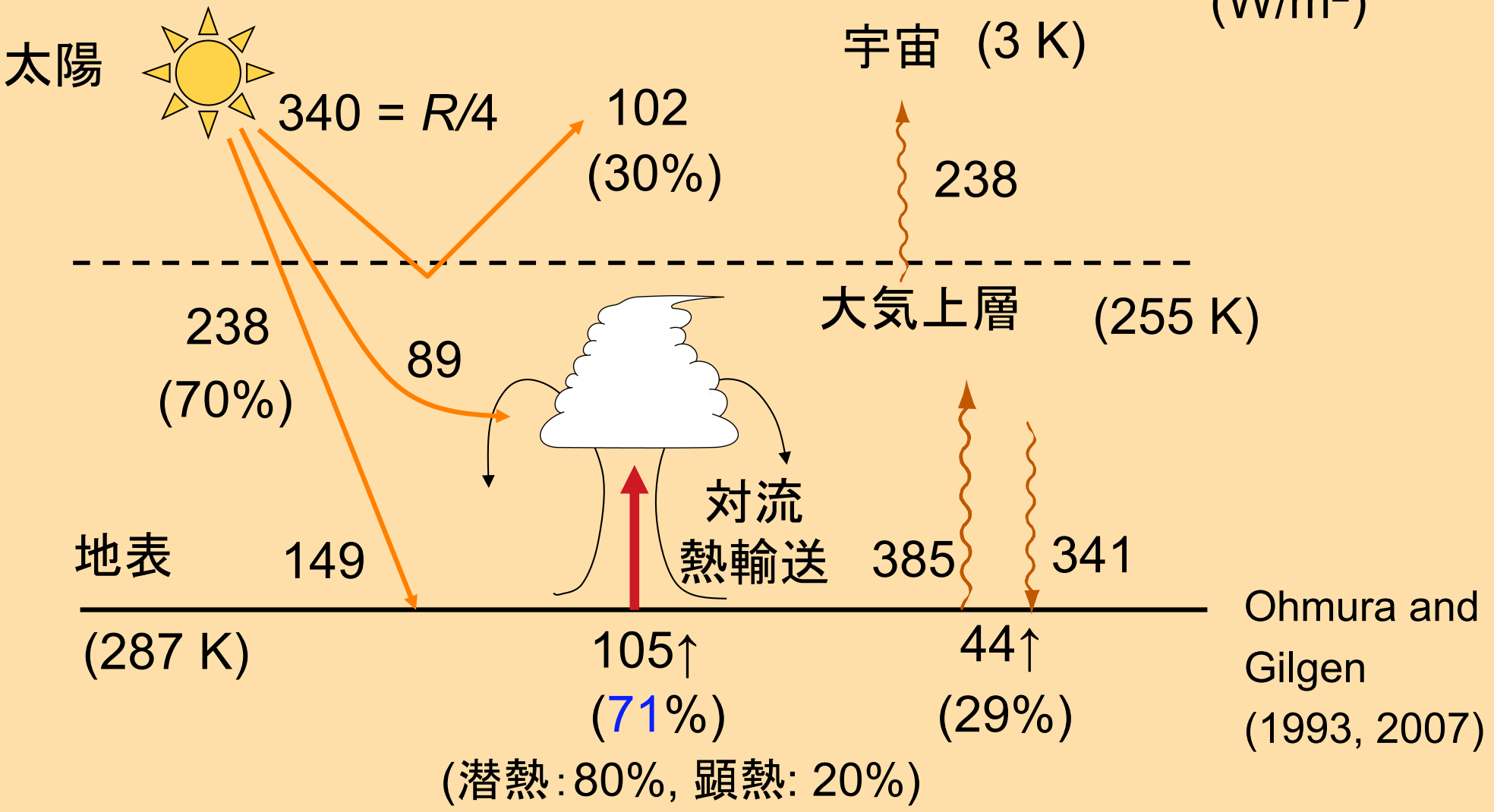


Hisashi Ozawa, Hiroshima Univ.

地球全体のエネルギー収支

単位表面積当たり

(W/m^2)



- 地表で吸収されるエネルギーの70%以上を，対流が輸送。

地球全体のエネルギー収支

対流冷却用スリット

太陽

340 = *R*/4

102
(30%)

宇宙 (3 K)

238

238
(70%)

89

大気上層 (255 K)

CO_2↗ H_2O↗

「温室」効果

対流
熱輸送

地表

149

+30 K

385

341

Ohmura and
Gilgen
(1993, 2007)

(287 K)

105↑
(71%)

44↑
(29%)

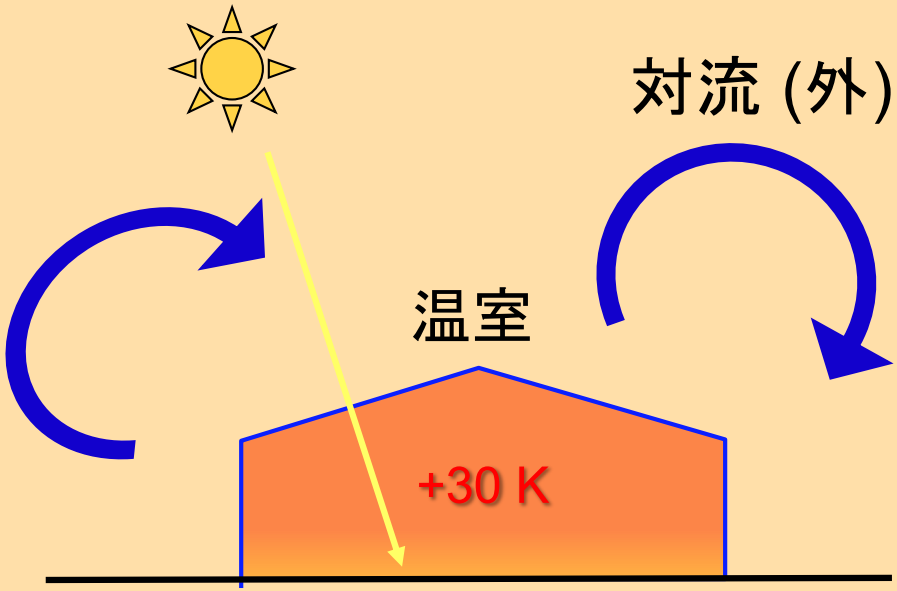
(潜熱:80%, 顕熱: 20%)

- 地表で吸収されるエネルギーの70%以上を，対流が輸送。

Hisashi Ozawa, Hiroshima Univ.

補足: 温室 (ビニールハウス) の温度上昇の理由

Businger (1963)



＊温室の「壁」が対流運動を遮断

1. 温室のビニール (ガラス) が，太陽の短波放射を透過するが，対流による熱の流出を防ぐ効果。[約80 %]

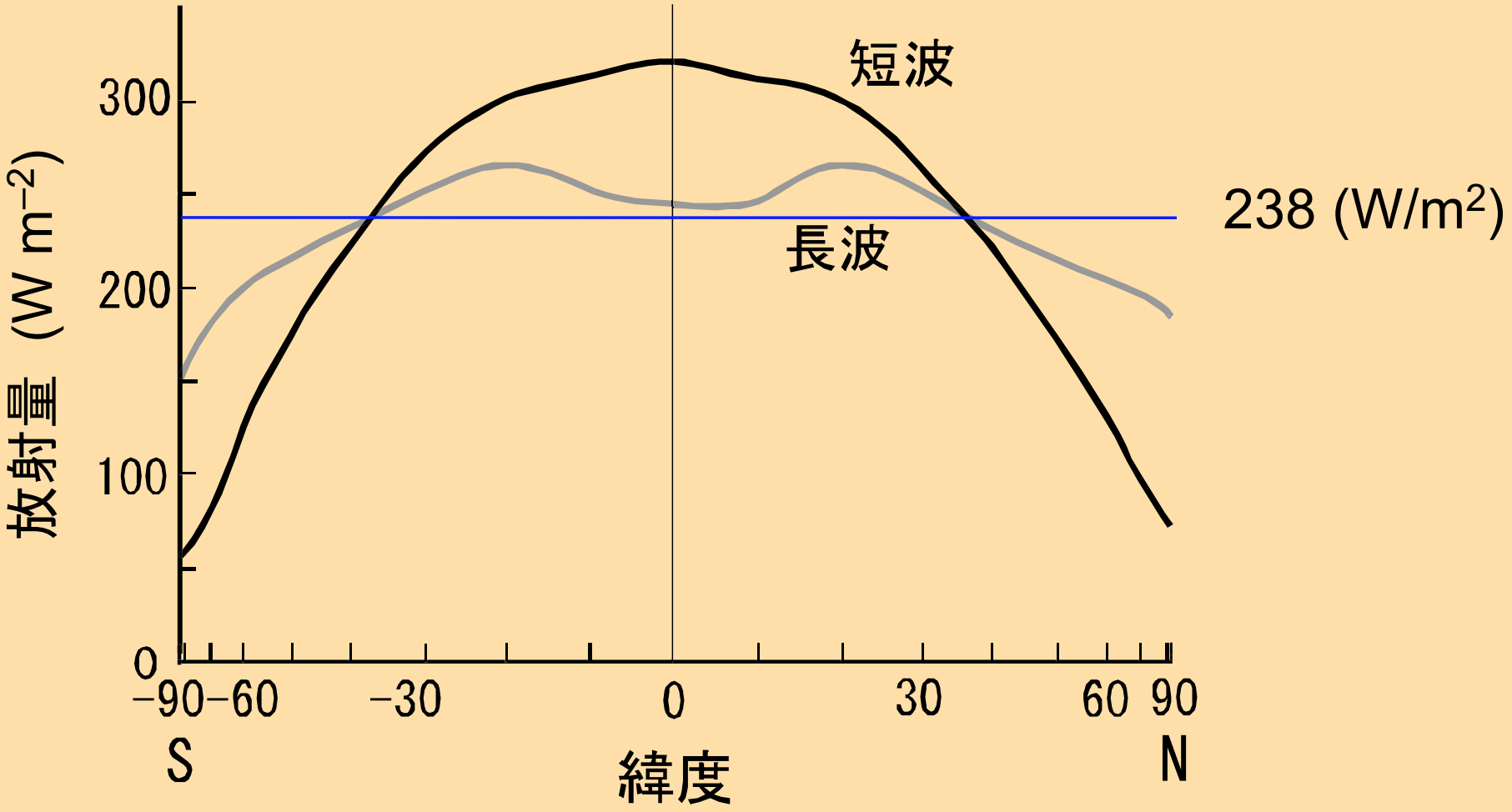
2. 温室のビニール (ガラス) が地表からの長波放射を吸収し，再放出により地面を暖める効果。 [約20 %]

- 温室を暖める効果は，1 の短波放射の透過と対流抑制効果が約80%。2 の長波放射を増やす効果より約4倍大きい。

- 大気の「温室」効果は，2 の効果のみ。1 の対流抑制効果はない。(大気は，屋根だけで壁のない温室。)

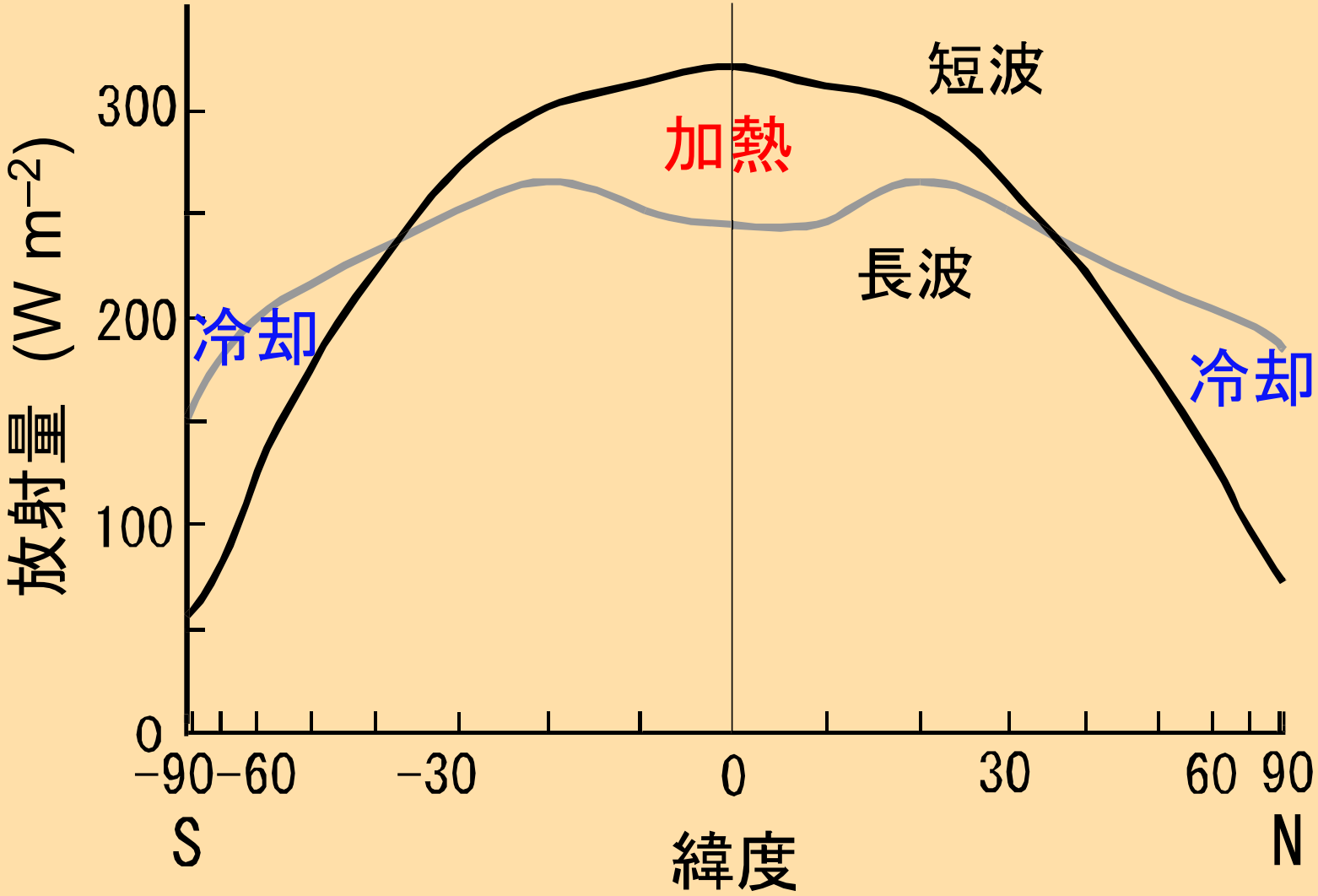
Hisashi Ozawa, Hiroshima Univ.

1-4. 放射収支の緯度分布



Hisashi Ozawa, Hiroshima Univ.

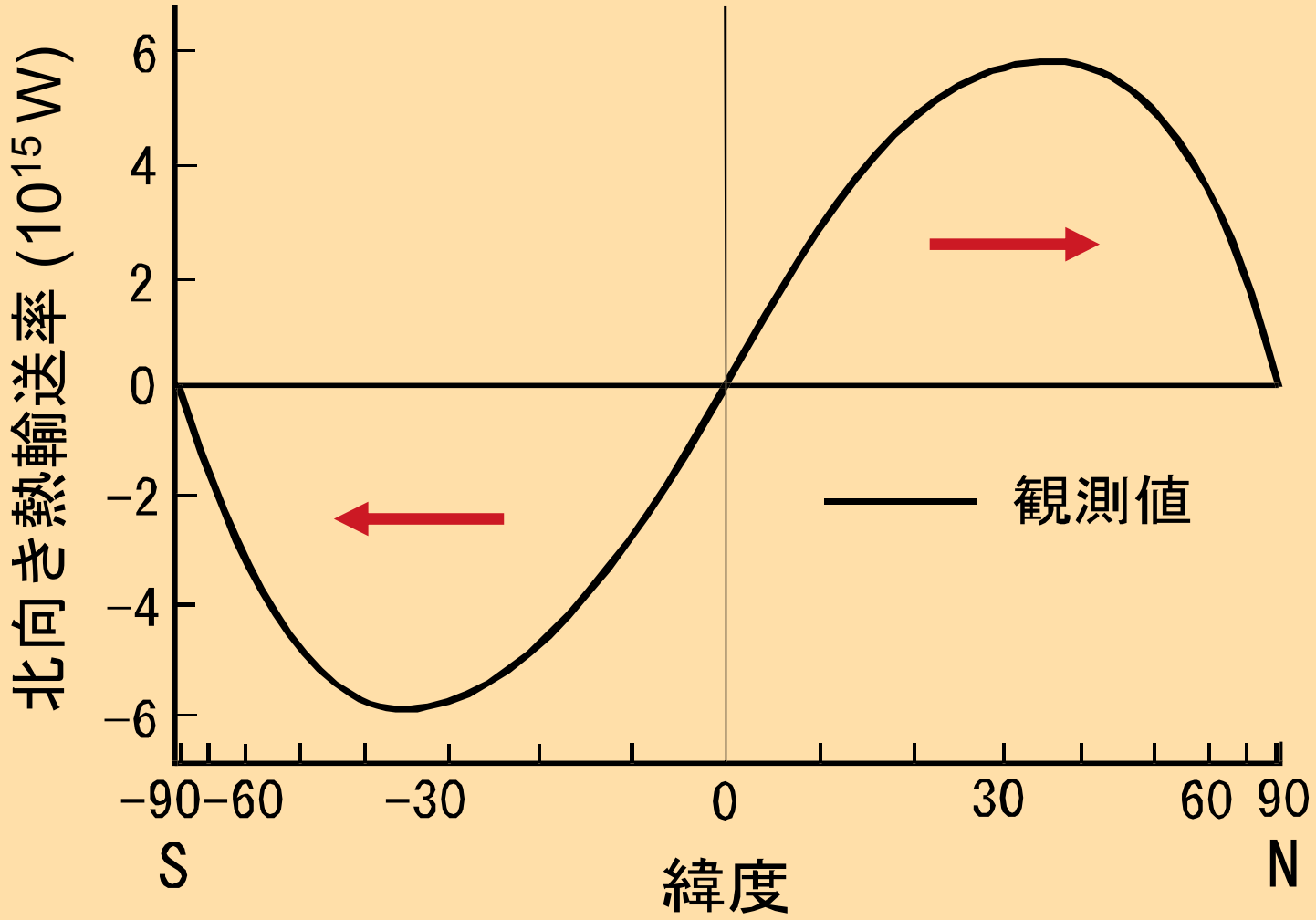
エネルギーの過不足



Hisashi Ozawa, Hiroshima Univ.

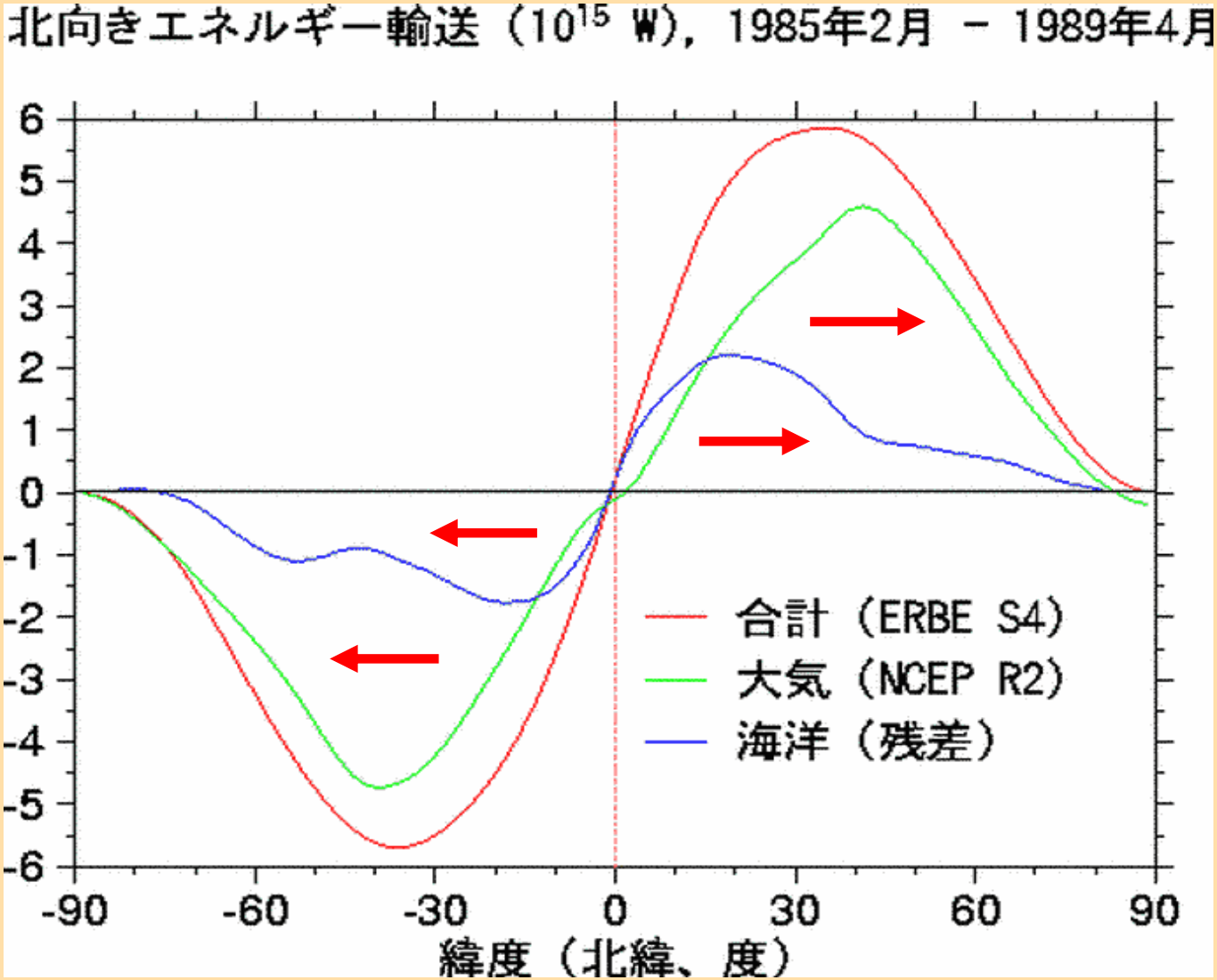
大気と海洋の運動による極向きの熱輸送

大循環

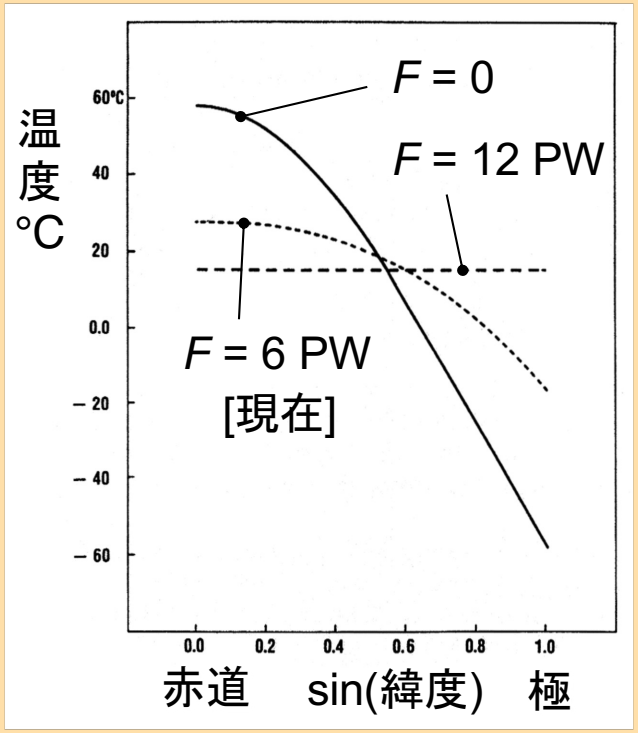


Hisashi Ozawa, Hiroshima Univ.

大気と海洋の寄与



by K. Masuda



North et al. (1981)

この熱輸送率がきまるしくみ

→ Part 2–3.

Hisashi Ozawa, Hiroshima Univ.

Part 1のまとめ

- 地球の大気は，生物活動の影響により，他の地球型惑星と異なる独特の組成を維持している。
- 地球の大気上層の平均温度（有効放射温度）は，太陽の短波放射の吸収率と地球からの長波放射の放出率のつり合いの条件から説明できる。
- 大気温度の高度分布は，有効放射温度に加えて，大気の「温室」効果，対流熱輸送，そして上空のオゾン層による加熱の効果から説明できる。
- 地表温度の緯度分布は，放射収支の緯度分布に加え，大気と海洋の大循環運動に伴う熱輸送率の分布によって特徴付けられている。

Part 2

引用文献リスト (Part 1)

Allégre, C. L., and Schneider, S. H., *Scientific American* **271**, 66, 1994.

Businger, J. A., in *Physics of Plant Environment,* Ed. W. R. van Wijk, 277-318, North-Holland Publ., Amsterdam, 1963.

Gueymard, C. A., *Solar Energy* **76**, 423, 2004.

Kaufman, A. J., *Nature* **386**, 227, 1997.

Kiehl, J. T., and Trenberth, K. E., *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **78**, 197, 1997.

Lovelock, J. E., *Atmospheric Environment* **6**, 579, 1972.

Lovelock, J., *The Ages of Gaia*, Oxford Univ. Press, Oxford, 1988 (邦訳 :「ガイアの時代」工作舎, 1989).

North, G. R., Cahalan, R. F., and Coakley, J. A. Jr., *Rev. Geophys.* **19**, 91, 1981.

Ohmura, A., and Gilgen, H., *Geophys. Monogr.* **75**, 93, 1993.

Planck, M., *Ann. Phys.* **4**, 553, 1901.

川上紳一,「生命と地球の共進化」日本放送出版協会, NHKブックス 888, 2000.

国立天文台編, 理科年表, 丸善, 2005.